基于GEE平台渭库绿洲棉花水分生产率遥感估算

何旭刚[1,2,3]， 买买提·沙吾提[1,2,3]， 盛艳芳[1,2,3]， 李荣鹏[1,2,3]
（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆绿洲生态重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘 要：作物水分生产率的准确和定量化评价是提高干旱区作物产量的基础，对缓解水资源短缺和农业可持续发展具有重要意义。以塔里木盆地北岸的渭干河–库车河绿洲（渭库绿洲）为典型区域，基于Google Earth Engine（GEE）云平台，通过建立2009—2020年流域SEBAL遥感蒸散发模型、棉花分布识别模型及估产模型，对流域棉花水分生产率进行评价。结果表明：(1) 渭库绿洲棉花产量从2009年的1610.10 kg·hm^{-2}增长到2020年的1855.05 kg·hm^{-2}，增长率为13.20%，棉花种植面积逐年向绿洲边缘延伸，棉花产量重心整体自西向东移动2485 m。(2) 棉花生长期2009年蒸散发均值为686.80 mm，2020年为738.66 mm，整体呈上升趋势，其增长率为7.02%，棉花生长期蒸散发最大值为花铃期和吐絮期，蒸散发较高值主要分布在绿洲内部与塔里木河北岸边缘。(3) 2009年水分生产率均值为0.21 kg·m^{-3}，2020年均值为0.25 kg·m^{-3}，12 a间水分生产率均值增长率为16%。在空间上，渭库绿洲水分生产率重心在红旗镇自东北向西南移动1832 m，年均移动速度为152.67 m·a^{-1}。绿洲棉花水分生产率呈现东西方向大于南北方向扩张趋势，空间分布方向趋势增强，空间格局趋向集聚化。(4) 12 a间产量的增长速度超过了蒸散发的上升速度，促使水分生产率提高。其次，水分生产率与棉花种植面积和合理的水量灌溉技术密切相关，水分生产率高值主要分布于沙雅县新垦农场和新和县桑塔木农场，由于农场规模化种植和集约化管理，促进了棉花增产、农业水资源的稳定分配和高效利用。

关 键 词：Google Earth Engine（GEE）；蒸散发；棉花提取；棉花产量；水分生产率；渭库绿洲
文章编号：1000－6060(2023)10－1632－11(1632～1642)

棉花作为最重要的经济作物，在我国新疆广泛种植，2022年新疆棉花种植面积为249.69×10^4 hm^2，总产达539.1×10^4 t，棉花种植面积、单产、总产连续28 a位居全国首位[1]，在新疆经济发展中占有举足轻重的地位。然而长期以来干旱少雨和缺水极大的限制了该地区棉花健康生长，尤其近年来，区域内生活、工业和生态用水占比逐渐增加，农业用水占比及可用水量在不断减小[2]，导致新疆棉花生产面临巨大挑战。因此，解决水资源短缺与提高作物产量，以及提高农业用水效率，已成为新疆尤其是南疆农业发展中面临的关键难题所在[3]。

水分生产率是指单位水资源量在一定的作物品种和耕作栽培条件下所获得的产量，是作物灌溉管理和水资源优化配置的主要依据和核心[4]。定量评价区域作物水分生产率是缓解干旱区水资源短缺和生态环境危机的重要前提。以往水分生产率研究基于田间实验观测和采用行政单元统计，不能准确表达空间分异和区域特征的需求。随着3S技术和Google Earth Engine（GEE）等平台的发展，遥感在农业领域的应用日益广泛[5]，遥感估算作物耗水量理论和方法日益完善，为区域作物识别、产量及耗水量估算等提供了可能，其中MODIS遥感数据具

收稿日期：2022-11-21； **修订日期**：2022-12-22
基金项目：新疆自然科学计划（自然科学基金）联合基金项目（2021D01C055）资助
作者简介：何旭刚（1995-），男，硕士研究生，主要从事农业遥感与农作物高效用水等方面的研究. E-mail: hexugang@stu.xju.edu.cn
通讯作者：买买提·沙吾提（1976-），男，博士，副教授，主要从事干旱区农业遥感应用等方面的研究. E-mail: korxat@xju.edu.cn

有高时间分辨率，周柳萍[6]、蒋磊等[7]和杨建莹[8]利用MODIS数据对小麦、玉米和大麦等水分生产率分析了时空变化，并探究了灌溉系数与影响因素。然而，MODIS数据的空间分辨率有限，对于破碎化耕地难以达到精细要求[9]。Landsat影像有更高的空间分辨率，可以满足长时间序列的耕地作物识别精度，Zhou等[10]和Ghorbanpour等[11]利用遥感数据估算了冬小麦和夏玉米等水分生产率，进一步对管理尺度评价，但以上研究中缺少对棉花作物水分生产率的分析，虽然Mauget[12]、Chen等[13]、Thorp等[14]和Himanshu等[15]使用田间控制灌溉的方法对小型棉田水分生产率估算，但研究集中于小区域，缺乏较大空间尺度、长时间序列的研究，并无法满足棉花水分生产率时空变化的分析视角。

鉴于此，本文利用GEE平台的优势构建棉花识别模型、估产模型和蒸散发模型，对渭干河-库车河绿洲（简称渭库绿洲）棉花水分生产率进行探究，揭示棉花种植和产量时空分布、棉花生育期内耗水量的时空变化规律，在此基础上对棉花水分生产率进行定量评价，可为干旱区棉花生产提供科学管理和技术参考。

1　研究区概况

渭库绿洲（82°00′～83°60′E，41°00′～41°85′N）位于新疆南部，地处塔里木盆地和塔克拉玛干沙漠北缘，是典型而完整的山前冲洪积扇平原，隶属阿克苏地区的库车、沙雅和新和3个县级行政区（图1）。光热资源丰富，降水稀少，蒸发强烈，气温差异显著，年均气温9.7~12.9 ℃，年降水量28.9~194.7 mm，年均蒸发量2000.7~2092.0 mm[16]。渭干河成为流域内生态、农业、人民生产生活用水的主要来源[17]。渭库绿洲是干旱区绿洲农业的典型代表，以种植棉花、小麦作物为主。

2　数据与方法

2.1　研究数据与处理

为保证研究区该年有充足的影像估算棉花全育期的蒸散发，结合2014年国家政策对新疆棉花产量和价格的调整，选用前后年份的数据，即2009—2020年Landsat影像逐年6—7月数据用于棉花提取和产量估算；其次筛选2009年（含2008年5月8日、

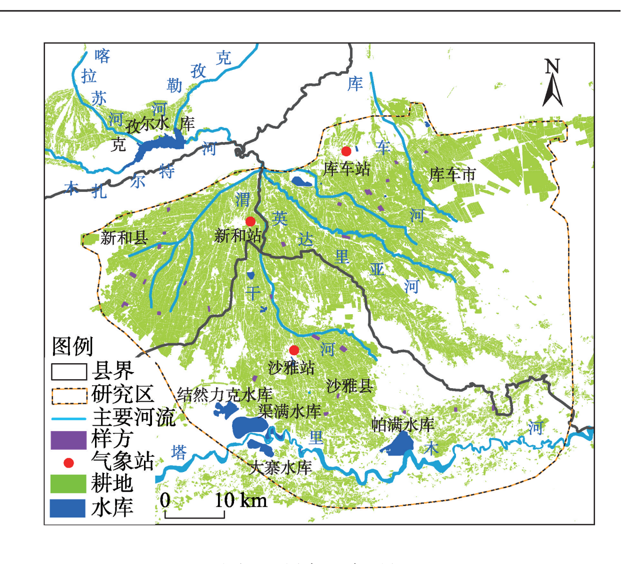


图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

2008年6月9日）和2020年（含2019年4月5日）棉花生长期（4—10月）影像14景，结合使用气候再分析数据ERA5、数字高程数据SRTM等进行蒸散发遥感反演；同时使用蒸散发数据MOD16A2和气象数据验证蒸散发的精度，Landsat数据基本信息见表1。

表1　研究数据

Tab. 1　List of the data used in this study

名称	空间分辨率/m	波段数量	成像时间(年-月-日)	影像数量
Landsat_8	30	13	2013-06-23、2014-07-08 2015-07-15、2016-07-17 2017-07-04、2018-07-23 2019-07-26、2019-04-05 2020-05-25、2020-06-26 2020-07-28、2020-08-29 2020-09-14、2020-10-16	14
Landsat_5	30	13	2008-05-08、2008-06-09 2009-04-25、2009-07-14 2010-08-31、2009-09-31 2009-10-18、2010-07-17 2011-07-04	9
Landsat_7	30	11	2012-05-11、2012-07-14	2

实地调研数据来自研究区历年农作物调查数据，2009年至今每年一次，获取30个样方，样方大小为500 m×500 m，样方包括作物类型、面积、长势、水分、温度等；另历年采集各类作物随机样本点若干。

气象数据来源于国家气象信息中心（http://data.cma.cn）发布的渭库绿洲内3个气象站（沙雅站、库车站、新和站）的逐日平均气温、最低、最高气温、降雨、风速、日照时间等；2009—2020年《阿克苏统计

年鉴》作为棉花产量估算参考和验证数据。

遥感数据均来自于GEE云平台(https://earthengine.google.com),利用GEE云平台对影像数据去云、裁剪和拼接等预处理,将空间分辨率统一重采样为30 m,然后使用该平台提供的JavaScript语言和函数进行数据处理和模型构建。

2.2 研究方法

本研究根据作物水分生产率原理,通过遥感数据等数据,在GEE平台建立研究区域棉花种植区分布识别模型、估产模型和SEBAL遥感蒸散发模型,进而构建棉花水分生产率估算模型。同时结合局部空间自相关、标准差椭圆与重心迁移分布等地理分析方法,并准确和定量化评价研究区棉花水分生产率时空分布特征。

2.2.1 棉花水分生产率估算 水分生产率反映了农业水量投入和产出的效率,是衡量农业科学和合理用水的综合指标,即作物经济产量与实际蒸散发的比值[18],计算公式如下:

$$WP = \frac{Y}{ET} \tag{1}$$

式中:WP为作物水分生产率($kg \cdot m^{-3}$);Y为作物产量($kg \cdot hm^{-2}$),通过建立遥感估产模型估算得到;ET为作物的蒸散发($mm \cdot d^{-1}$),通过遥感定量反演获得,并通过气象站和蒸散发产品数据验证。

2.2.2 棉花产量估算 根据预处理后的Landsat系列影像,选取各地物样本点的纯净像元,利用GEE平台构建主要作物生育期归一化植被指数(NDVI)[19-22]时间序列曲线,根据棉花NDVI特征,获取棉花出苗期和花铃期的影像,通过时间特征,结合光谱特征、纹理特征、地形特征等构建分类特征。将提取的棉花种植面积与统计年鉴数据进行逐年对比,其平均相对误差均小于5%。最终,选取分类精度较高的随机森林方法进行分类,总体精度为83%,Kappa系数为0.78。因此,本文利用随机森林分类方法提取研究区棉花种植面积。

进一步使用NDVI指数进行产量估算[23-26],以往研究中棉花的产量与NDVI具有较强的相关性,并在实际得到充分的验证[23-25],因此本研究使用栅格图像推算,将县级产量图扩展到像元级空间分布,结合统计年鉴中的棉花经济产量数据,得到研究区3个县级区划的棉花产量像元级的均值,然后利用棉花的NDVI指数扩展到单个像元的棉花产量[27],计算公式如下:

$$Y_P = Y_{avg} \times \frac{NDVI_P}{NDVI_{avg}} \tag{2}$$

式中:Y_P为单个像素级的棉花产量($kg \cdot hm^{-2}$);Y_{avg}为县级棉花平均产量,从统计年鉴获得;$NDVI_P$为花铃期NDVI值;$NDVI_{avg}$为县级花铃期平均NDVI值。然后根据数值建立棉花产量线性关系。

2.2.3 棉花蒸散发遥感反演 SEBAL(Surface energy balance algorithm for land)模型是以陆面能量平衡为理论基础,通过遥感影像和气象参数对各地表分量进行估算,得到区域的实际蒸散发。地表能量平衡方程为[28]:

$$\lambda ET = R_n - G - H \tag{3}$$

式中:R_n为地表的净辐射通量($W \cdot m^{-2}$);G为土壤热通量($W \cdot m^{-2}$);H为下垫面到大气的感热通量($W \cdot m^{-2}$);λET为潜热通量($W \cdot m^{-2}$),其中λ为潜热蒸发系数,ET为蒸散发($W \cdot m^{-2}$),在计算水分生产率时,将ET单位转换为$mm \cdot d^{-1}$。

因为卫星过境时所观测的是地面瞬时数据,因此把瞬时蒸散发扩展到日蒸散发,蒸散比在白天变化较小,可以假定白天蒸发比保持不变,根据瞬时蒸散比和日有效辐射能量计算出日蒸散发,利用日蒸散比插值法,得到卫星过境日前后一段时间的逐日蒸发比[29],然后根据各日的有效净辐射量,计算出逐日蒸散发:

$$ET_d = \frac{(R_n - G)_d}{(R_n - G)_i} ET_i \tag{4}$$

式中:ET_d为第d天蒸散发值;ET_i为卫星过境时i的瞬时蒸散发值。

2009—2020年间,由于缺乏中间年份棉花生长期蒸散发估算的连续遥感影像,本文根据棉花生长物候历[30],选取起始和最终2 a的棉花生长期影像估算蒸散发。以研究区新和、沙雅、库车3个气象站点作为样点,使用基于气象站的P-M方法与SEBAL模型对3个站点的平均蒸散发精度验证,得到2009年蒸散发平均绝对误差为0.56 $mm \cdot d^{-1}$、2020年为0.27 $mm \cdot d^{-1}$,同时利用MODIS16A2数据8 d产品棉花生长期累积蒸散发精度检验,与SEBAL模型反演的2009年蒸散发平均绝对误差为0.25 $mm \cdot d^{-1}$、2020年为0.27 $mm \cdot d^{-1}$,两种数据都具有较高一致性,并取得较为满意的估算结果。

3　结果与分析

3.1　棉花产量时空分析

棉花产量的时空变化是研究水分生产率的前提，将遥感估算的县级总产量与统计年鉴数据逐年精度对比，其平均误差小于8%。如图2所示，2009—2020年渭库绿洲棉花产量呈增加趋势，从2009年的1610.10 kg·hm^{-2}增长到2020年的1855.05 kg·hm^{-2}，产量增长率为13.20%。从各县来看，新和县增长6.09%，沙雅县增长12.72%，库车市增长20.74%，新和县的产量最高，其次为沙雅县和库车市。渭库绿洲产量在2010年最低(1520.04 kg·hm^{-2})，2019年达到最高(1984.80 kg·hm^{-2})，2014年出现低谷(1645.05 kg·hm^{-2})。由于2014年棉花价格调整，开始大面积种植，水土和管理措施不成熟等原因使得棉花产量较低，而在2015年之后趋于稳定上升，主要由于棉花种植面积增加导致产量逐年上升[31]，加之政策补贴、水肥精细管理和机械化程度持续提高，对棉花产量起了推动作用。

采用500 m×500 m格网，对2009—2020年逐年棉花产量按县级行政进行重心迁移规律分析，新和县产量重心在玉奇喀特乡和渭干乡之间移动(图3a)。沙雅县棉花产量重心稳居于古勒巴格乡(图3b)，呈现出先西后东移动趋势。库车市产量重心主要位于墩阔坦镇、阿克吾斯塘乡、齐满镇(图3c)。渭库绿洲产量重心在沙雅县红旗镇和努尔巴格乡之间波动迁移(图3d)，12 a间自西向东移动2485 m，表明渭库绿洲棉花产量随着种植面积增加向东西方向扩展。总体上，棉花产量各时间点的标准差椭圆长轴各自沿绿洲下游方向逐渐移动，库车市和沙雅县椭圆面积大于新和县，新和县总体趋势自东北向西南方向扩展，沙雅县自西向东趋势移动，库车市则自西南向东北方向延伸(图3e)。

3.2　棉花生长期蒸散发量时空分析

棉花生长期蒸散发的准确估算是研究水分生产率的重要环节，渭库绿洲棉花生长期蒸散发2009年为237.86~843.95 mm(均值为686.80 mm，日均蒸散发为3.71 mm)，蒸散发最大值为花铃期，其次为吐絮期、蕾期、苗期和出苗(图4k)。蒸散发高值主要分布在渭库绿洲内部河流周围及棉田小规模种植区域(图4a~e)。2020年棉花生长期蒸散发为493.13~996.3 mm(均值为738.66 mm，日均蒸散发为3.99 mm)，其中蒸散发最大值为花铃期，其次为吐絮期、苗期、蕾期、出苗(图4l)。蒸散发高值主要在绿洲内部及塔里木河北岸边缘(图4f~j)，由于地势低洼土壤含水量较高又毗邻沙漠边缘，蒸散发偏高，低值主要分布在渭库绿洲东北和西南边缘，由于棉花集中连片种植，使用滴管技术降低水分蒸发。整体上，12 a间棉花生长期蒸散发2020年高于2009年，其增长率为7.02%，尤其在花铃期和吐絮期蒸散发均值明显高于2009年，但苗期蒸散发均值低于2009年，然而取值范围变大，表明该阶段渭库绿洲气候差异性较为明显，其余生长阶段蒸散发均值较为稳定(图4k~l)。随着全球气温上升，表明该区域蒸散发也呈上升趋势，棉花蒸腾作用加剧。

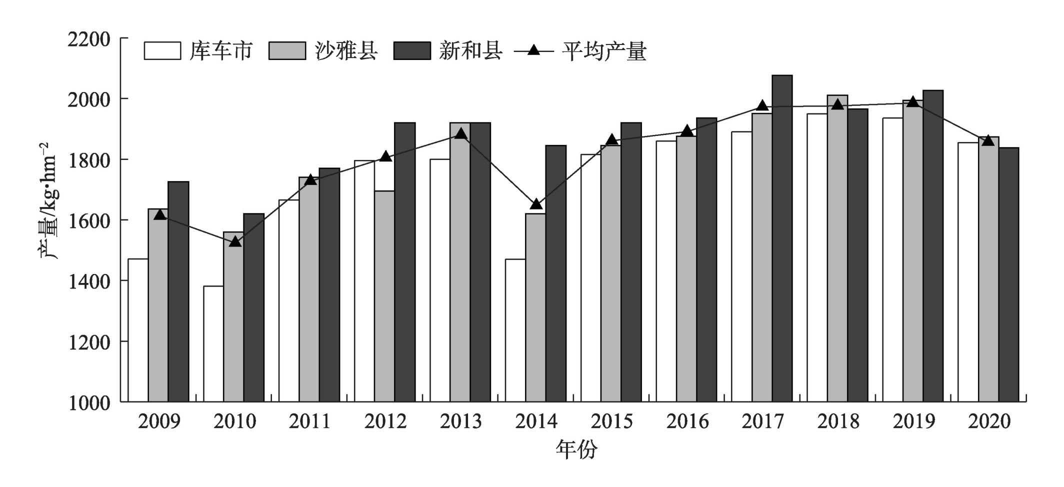
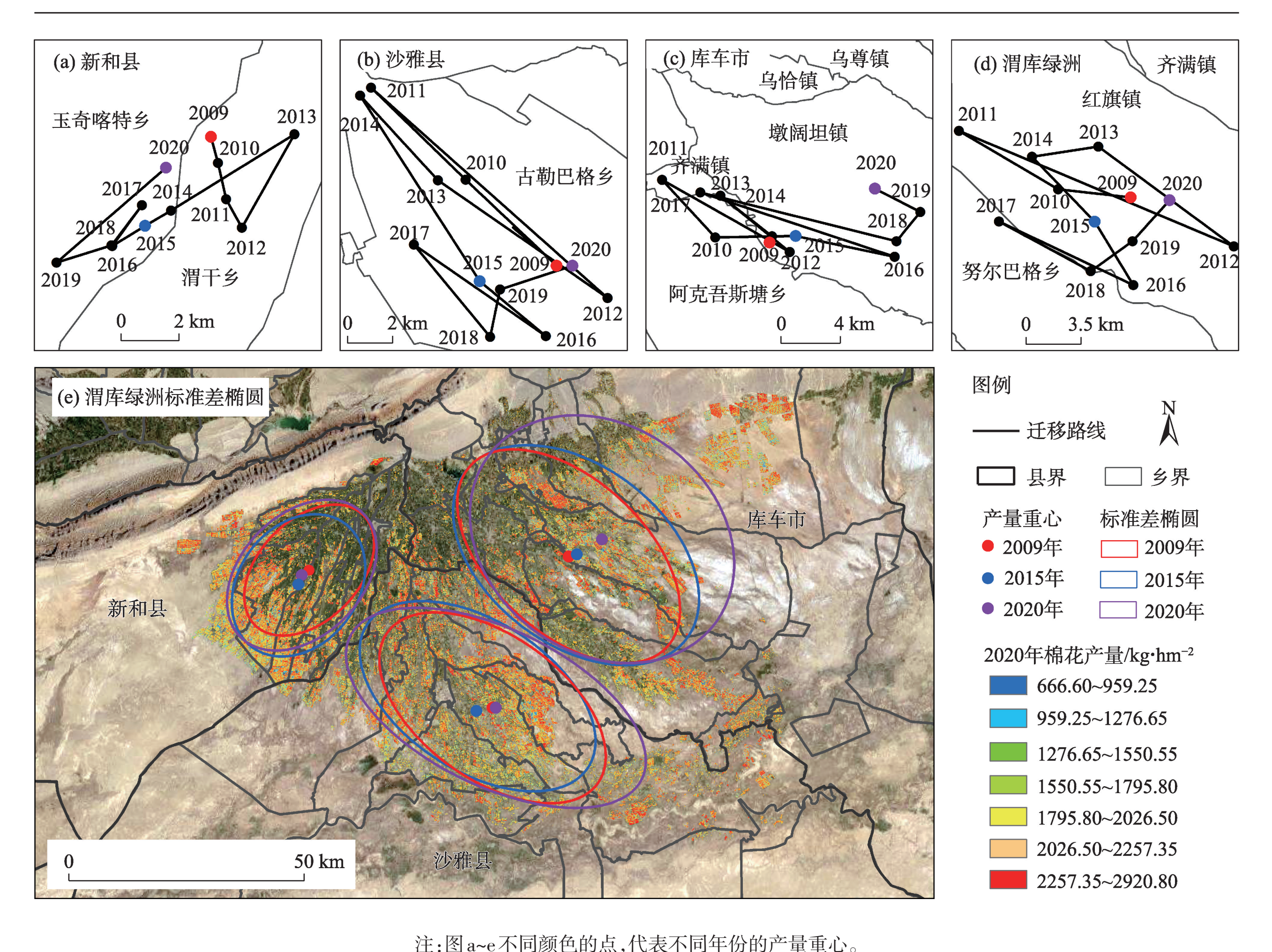


图2　2009—2020年棉花产量统计

Fig. 2　Statistics on cotton yield from 2009 to 2020



注:图a~e不同颜色的点,代表不同年份的产量重心。

图3 棉花产量标准椭圆差与重心迁移变化

Fig. 3 Standard deviation ellipse and gravity movement of cotton yield

3.3 棉花水分生产率时空分析

3.3.1 棉花水分生产率时空变化分析 基于像元统计水分生产率频率统计,可以精准量化逐像元棉花水分生产率情况,由图5可知,2009年棉花水分生产率变化范围为0~0.40 $kg\cdot m^{-3}$(均值为0.21 $kg\cdot m^{-3}$),2020年棉花水分生产率变化范围为0~0.45 $kg\cdot m^{-3}$(均值为0.25 $kg\cdot m^{-3}$),12 a间增长率为16%。2009年棉花水分生产率在0.18~0.25 $kg\cdot m^{-3}$之间,有明显的一个峰值期,在0.21 $kg\cdot m^{-3}$对应的像元数最多,达到14632个。2020年棉花水分生产率在0.17~0.33 $kg\cdot m^{-3}$之间,有明显的一个峰值期,在0.28 $kg\cdot m^{-3}$对应的像元数最多,达到26478个,2009年峰值比较集中,2020年向横轴右侧移动,高值区间增大且较为分散。12 a间水分生产率较高的区域增多,棉花水分生产率整体提高,布局更加合理。将水分生产率累积频率为95%的像元值统计作为临界值,2009年对应的值为0.37 $kg\cdot m^{-3}$,2020年为0.41 $kg\cdot m^{-3}$,大于该临界值的为水分生产率较高区域,该区域在2009年主要集中分布在渭干乡,2020年分布于玉奇喀特乡,2个乡均位于新和县且两乡毗邻,土壤以残余内陆盐土为主,灌渠设施密集,其中棉花呈现连片化和规模化种植。

为准确分析水分生产率在空间的聚集程度和演变趋势,以县级行政和绿洲为单位,建立棉花种植区标准差椭圆和水分生产率重心点。2009年和2020年新和县水分生产率重心点分布位于渭干乡和玉奇喀特乡(图6a),标准差椭圆的长轴持续增长且短轴持续缩短(图6e),自2009年(82.25°E,41.27°N)移动至2020年(82.21°E,41.25°N),自东北向西南方向平均移动速度为888 $m\cdot a^{-1}$,由于棉花种植面积的扩张和产量的增加,水分生产率重心趋势逐渐向绿洲外缘延伸。2009年和2020年沙雅县水分生产率

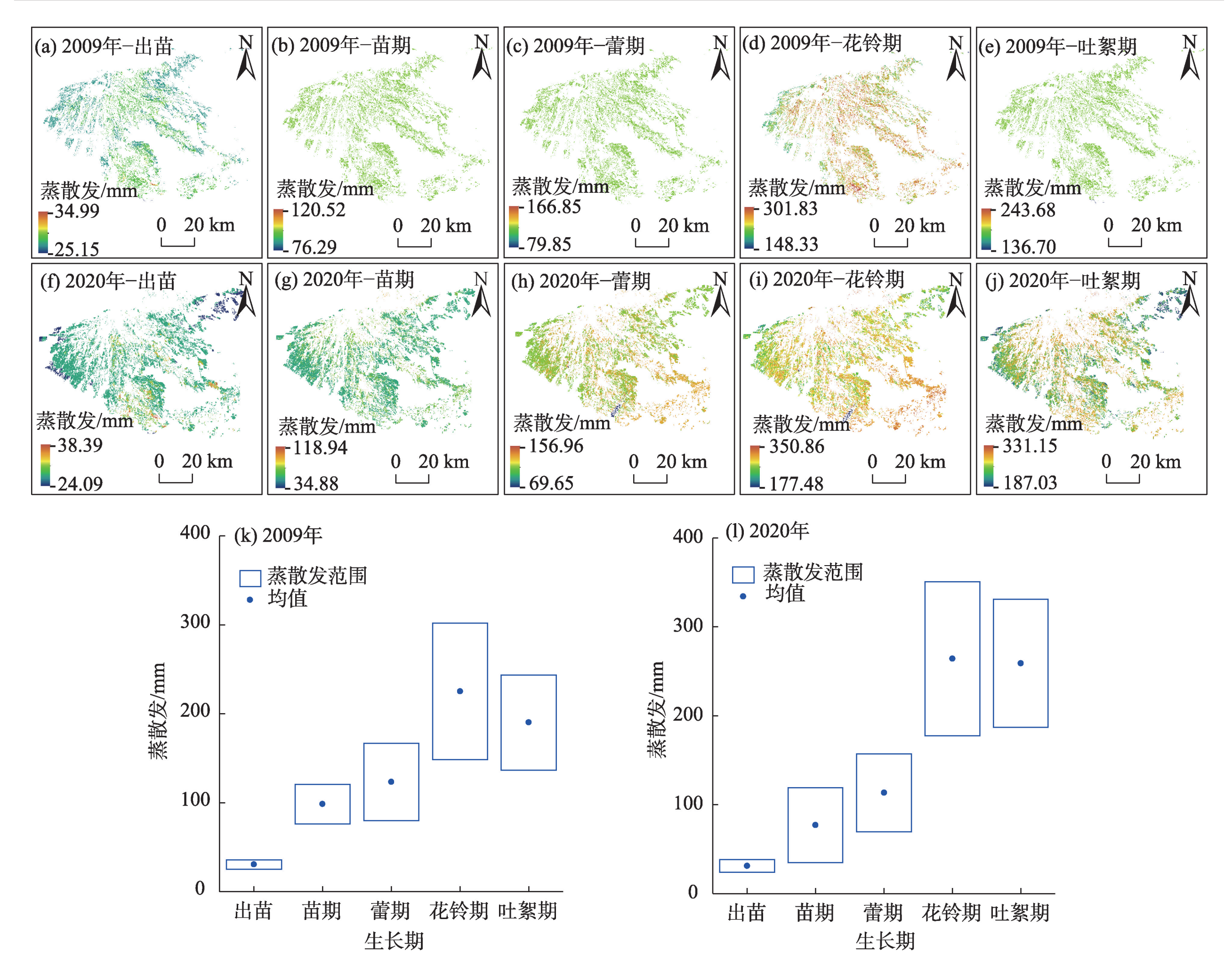


图4　棉花生长期蒸散发

Fig. 4　Evapotranspiration during cotton growing

重心点均位于古勒巴格乡(图6b),自2009年(82.53°E,41.11°N)移动至2020年(82.52°E,41.12°N),重心点自东南向西北平均移动速度为320 m·a^{-1},12 a间变化趋势较小,由于靠近塔里木河岸和沙雅县南部沙漠边缘棉花生长期耗水量较大,使得水分生产率重心向绿洲内部移动。2009年和2020年库车市水分生产率重心均位于墩阔坦镇(图6c),生产率标准差椭圆的长轴缩短而短轴增长,其水分生产率重心点从2009年(83.05°E,41.28°N)移动至2020年(83.12°E,41.29°N),自西向东平均移动速度为1071 m·a^{-1}。12 a间水分生产率重心移动速度依次为:库车市>新和县>沙雅县,表明库车市棉花水分生产率以最快速度自西向绿洲东部边缘移动,棉花产量和蒸散发的变化直接影响水分生产率重心的迁移,同时说明库车市棉花种植面积和产量重心向绿洲边缘延伸面积最大。

总体上,渭库绿洲水分生产率重心由2009年(82.51°E,41.22°N)移动至2020年(82.52°E,41.21°N),自东北向西南移动距离为1832 m(图6d),年均移动速度为166.55 m·a^{-1},表明绿洲棉花水分生产率呈现扩张趋势且东西方向大于南北方向。渭库绿洲水分生产率标准差椭圆的长轴持续增长同时短轴缩短(图6f),长轴短轴的共同作用下离心率逐渐增长,同时标准差椭圆的面积由2009年的3487.72 km^{2}逐渐增加到2020年的4122.78 km^2,县级尺度(图6e)和流域尺度(图6f)标准差椭圆面积均增加,表明12 a间渭库绿洲棉花水分生产率空间分布方向趋势增强,空间格局趋向集聚化。

3.3.2　棉花水分生产率局部空间自相关分析　以500 m×500 m格网数据为基础,对棉花水分生产率进行LISA聚集性和Moran's I指数分析,其中2009年和2020年棉花水分生产率的Moran's I指数分别为0.349和0.496,表明水分生产率具有显著的空间自相关。LISA聚类图是对Moran's I指数中通过了显

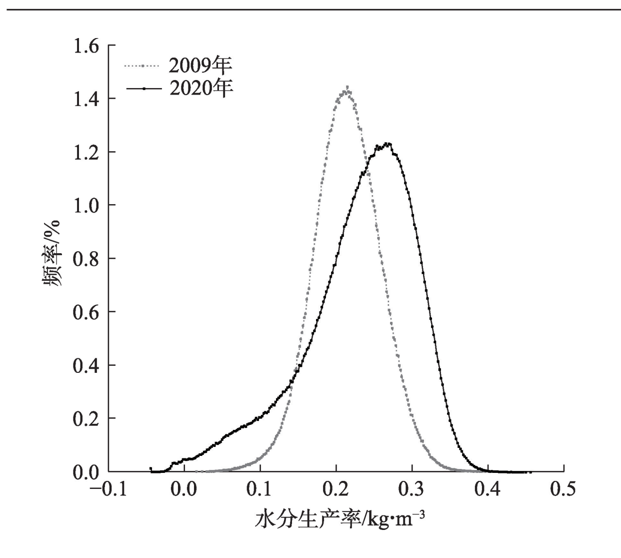


图5 2009年与2020年水分生产率频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of water productivity in 2009 and 2020

著性检验的区域单元的地理表达，渭库绿洲正相关聚集(高-高聚集或低-低聚集)较为明显，聚集程度呈现上升趋势，异常区(高-低聚集或低-高聚集)呈零散分布，且波动较小(图7)。2009年高值聚集区主要位于新和县西侧绿洲边缘和沙雅县古勒巴乡，其余高值聚集区呈零散分布，该区域棉花种植较为密集，且产量较高，同时耗水量低，使得水分生产率高而聚集(图7a)。低值聚集区零散条带状分布于绿洲中部且在沙雅县境内最多，说明棉花产量较低且耗水量大，导致水分生产率低。异常区零散均匀分布于整个绿洲。2020年正相关程度逐渐上升且向绿洲边缘扩展，空间分布基本上与2009年一致，但低值在绿洲边缘和塔里木河北岸增加，表明该地水分生产率较低，由于新开垦的土地土壤贫瘠，没有形成大规模化种植，产量较低(图7b)。以上分析得到，高值区主要分布于沙雅县新垦农场和新和县桑塔木农场，所以在一定程度上说明，农场规模化种植增产和科学化灌溉，促使棉花产量和水分生产率提高。

4 讨论

本文充分利用GEE云平台强大的计算能力，建

图例 县界 乡界 主要河流 迁移路线 水分生产率重心 ● 2009年 ● 2020年 标准差椭圆 2009年 2020年

图6 棉花水分生产率空间分布及重心迁移

Fig. 6 Spatial distribution and gravity movement of cotton water productivity

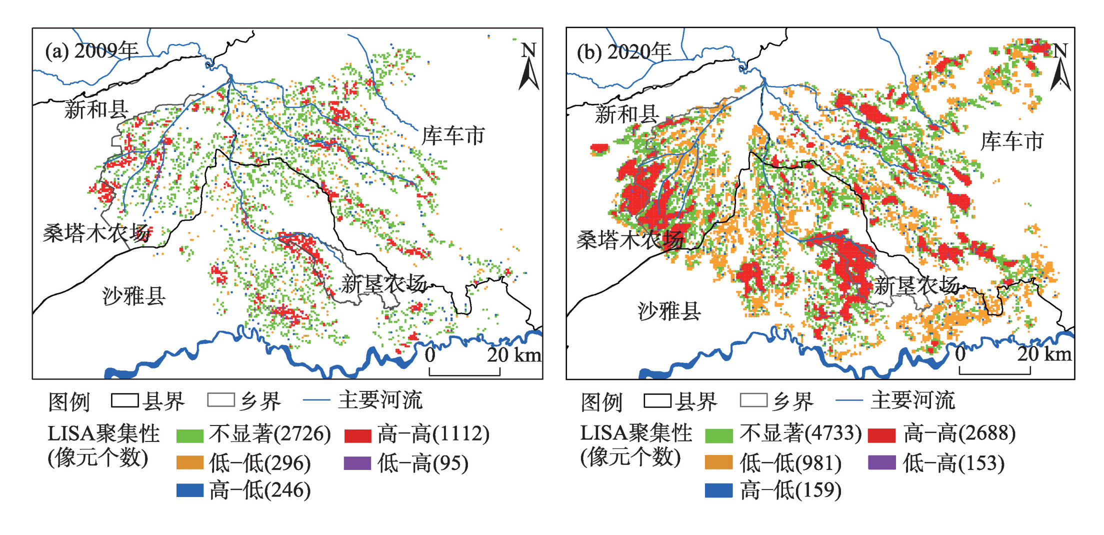


图7　水分生产率LISA聚集图

Fig. 7　LISA aggregation diagram of water productivity

立研究区遥感模型，分析棉花水分生产率的时空分布，为渭库绿洲提高农业用水效率和缓解水资源供需矛盾提供新思路。同时，为今后新疆小麦、玉米等主要作物水分生产率遥感估算提供基础。

在棉花产量遥感估算中，本文使用NDVI指数法和统计数据空间化估算棉花产量，该方法比较通用且简单，得到的结果与统计产量数据一致，能够满足像元级产量推算且效果较好。以往较多研究[32−33]使用增强植被指数(EVI)建立估产模型，今后应与该指数结合对棉花面积提取和估产，进一步提高估产精度。从渭库绿洲棉花生长期蒸散发来看，本文使用的SEBAL模型遥感估算棉花生长期蒸散发较好的结果，在精度分析中，除了使用气象站点数据外，还使用了MOD16A2数据进一步验证，为估算结果提供有利的数据支持和可靠性。针对干旱区作物蒸散发遥感估算的模型较多，如周柳萍[6]使用SSEB模型、Zhou等[10]使用SEBS模型、于兵[34]使用HTEM-ABL模型，今后研究中应结合多种模型对作物生长期的蒸散发估算。充分定量化利用空间自相关、标准差椭圆与重心转移等空间分析方法进行棉花水分生产率时空分布。本研究遥感数据估算了棉花水分生产率起始和最终2 a，今后可以补充并加强连续性数据，如使用高空间分辨率Landsat数据和高时间分辨率MODIS影像时空融合的方法[10]提高水分生产率时间序列的分析。此外，以往研究中缺乏新疆棉花水分生产率的研究，本研究拓展并利用GEE平台优势和遥感数据，大面积对棉花水分生产率进行县域尺度和流域尺度时空分析与研究。影响水分生产率的主要因素为产量和蒸散发，12 a间产量的增长速度超过了蒸散发的上升速度，使得水分生产率提高。

5　结 论

（1）2008—2020年棉花种植面积整体呈增加趋势，棉花种植面积逐年向绿洲边缘扩展。同时，棉花产量也呈增加趋势，从2009年的1610.10 $kg\cdot hm^{-2}$增长到2020年的1855.05 $kg\cdot hm^{-2}$，产量增长率为13.20%，平均每年增长1.1%，新和县的棉花产量最高，库车市产量最低。产量重心整体自西向东移动2485 m。

（2）渭库绿洲棉花生长期2009年蒸散发均值为686.80 mm，日均值为3.71 mm，2020年为738.66 mm，日均值为3.99 mm，整体呈上升趋势，增长率为7.02%，2009年和2020年蒸散发最大值主要分布在绿洲内部与塔里木河北部边缘。

（3）2009年水分生产率均值为0.21 $kg\cdot m^{-3}$，2020年为0.25 $kg\cdot m^{-3}$，12 a间水分生产率均值增长率为16%。在空间上，渭库绿洲水分生产率重心由2009年(82.51°E，41.22°N)移动至2020年(82.52°E，41.21°N)，在红旗镇自东北向西南移动了1832 m，年均移动速度为152.67 $m\cdot a^{-1}$，棉花水分生产率呈现扩张趋势且东西方向大于南北方向，棉花水分生产率空间分布方向趋势增强，空间格局趋向集聚化。

参考文献(References)

[1] 新华网.新疆棉花产量占全国90.2%创历史新高[EB/OL]. http://www.news.cn/local/2022-12/27/c_1129236779.htm.2022-12-27. [Xinhua Net. Xinjiang's cotton production accounts for 90.2% of the country's total, a record high[EB/OL]. http://www.news.cn/local/2022-12/27/c_1129236779.htm.2022-12-27.]

[2] 胡栩, 聂勇, 徐霞, 等. 塔里木盆地南缘和田地区土地利用变化的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 577-590. [Hu Xu, Nie Yong, Xu Xia, et al. Monitoring land-use change in Hetian Tarim Basin, China using satellite remote sensing observation between 1990 and 2016[J]. Progress in Geography, 2020, 39(4): 577-590.]

[3] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988—2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究——基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242-253. [Zang Pei, Long Aihua, Hai Yang, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988—2015: Based on statistical analysis of crop water footprint[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 242-253.]

[4] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 590-598. [Cui Yuanlai, Xiong Jia. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 590-598.]

[5] 陈仲新, 郝鹏宇, 刘佳, 等. 农业遥感卫星发展现状及我国监测需求分析[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 32-42. [Chen Zhongxin, Hao Pengyu, Liu Jia. et al. Technical demands for agricultural remote sensing satellites in China[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 32-42.]

[6] 周柳萍. 基于遥感和气象数据的江苏省水稻水分生产率时空变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. [Zhou Liuping. Study on temporal and spatial variation of rice water productivity of Jiangsu Province based on remote sensing and meteorological data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.]

[7] 蒋磊, 杨雨亭, 尚松浩. 基于遥感蒸发模型的干旱区灌区灌溉效率评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 95-101. [Jiang Lei, Yang Yuting, Shang Songhao. Evaluation on irrigation efficiency of irrigation district in arid region based on evapotranspiration estimated from remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(20): 95-101.]

[8] 杨建莹. 基于SEBAL模型的黄淮海冬小麦和夏玉米水分生产力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [Yang Jianying. Study on water productivity of winter wheat and summer maize based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.]

[9] Waldhoff G, Lussem U, Bareth G. Multi-data approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: A case study for the Rur catchment, Germany[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 61: 55-69.

[10] Zhou Q, Zhang Y L, Wu F. Evaluation of the most proper management scale on water use efficiency and water productivity: A case study of the Heihe River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 246: 106671, doi: org/10.1016/j.agwat.2020.106671.

[11] Ghorbanpour A K, Kisekka I, Afshar A, et al. Crop water productivity mapping and benchmarking using remote sensing and Google Earth Engine cloud computing[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4934-4934.

[12] Mauget S, Ulloa M, Mitchell-McCallister D. Simulated irrigation water productivity and related profit effects in US Southern High Plains cotton production[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107582, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107582.

[13] Chen X P, Qi Z M, Gui D W, et al. Evaluation of a new irrigation decision support system in improving cotton yield and water productivity in an arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106139, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106139.

[14] Thorp K R, Thompson A L, Bronson K F. Irrigation rate and timing effects on Arizona cotton yield, water productivity, and fiber quality[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106146, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106146.

[15] Himanshu S K, Fan Y, Ale S, et al. Simulated efficient growth-stage-based deficit irrigation strategies for maximizing cotton yield, crop water productivity and net returns[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106840, doi: 10.1016/j.agwat.2021.106840.

[16] 柯映明. 近60年来渭干河流域耕地与胡杨的时空演变分析[D]. 北京: 中国科学院, 2020. [Ke Yingming. Spatiotemporal evolution analysis of cropland and *Populus euphratica* in Weigan River Basin in recent 60 years[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.]

[17] 张新焕, 杨德刚, 刘云同. 基于能值的绿洲种植业系统可持续性及敏感性评价——以新疆渭干河流域为例[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6068-6076. [Zhang Xinhuan, Yang Degang, Liu Yuntong. Emergy-based sustainability and sensitivity analysis of oasis cropping system: A case study in Weigan River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6068-6076.]

[18] Paul M, Rajib A, Negahban-Azar M, et al. Improved agricultural water management in data-scarce semi-arid watersheds: Value of integrating remotely sensed leaf area index in hydrological modeling[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148177, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148177.

[19] 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于MODIS-NDVI的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. 地理研究, 2012, 31(12): 2310-2320. [Zhao Wenliang, He Zhen, He Junping, et al. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI data[J]. Geographical Research, 2012, 31(12): 2310-2320.]

[20] 王文静, 张霞, 赵银娣, 等. 综合多特征的Landsat 8时序遥感图像棉花分类方法[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 115-124. [Wang Wenjing, Zhang Xia, Zhao Yindi, et al. Cotton extraction method

of integrated multi-features based on multi-temporal Landsat 8 images[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 115-124.]

[21] 田艳君, 石莹, 帅艳民, 等. 基于遥感时序特征的地表覆被信息提取[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 450-459. [Tian Yanjun, Shi Ying, Shuai Yanmin, et al. Land cover information retrieval from temporal features based remote sensing images[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 450-459.]

[22] 刘雅婷, 龚龑, 段博, 等. 多时相NDVI与丰度综合分析的油菜无人机遥感长势监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 265-272. [Liu Yating, Gong Yan, Duan Bo, et al. Combining multi-temporal NDVI and abundance from UAV remote sensing data for oilseed rape growth monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(2): 265-272.]

[23] 刘焕军, 孟令华, 张新乐, 等. 基于时间序列Landsat影像的棉花估产模型[J].农业工程学报, 2015, 31(17): 215-220. [Liu Huanjun, Meng Linghua, Zhang Xinle, et al. Estimation model of cotton yield with time series Landsat images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 215-220.]

[24] 高中灵, 徐新刚, 王纪华, 等. 基于时间序列NDVI相似性分析的棉花估产[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 148-153. [Gao Zhongling, Xu Xingang, Wang Jihua, et al. Cotton yield estimation based on similarity analysis of time-series NDVI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 148-153.]

[25] Meng H L, Liu H J, Zhang X L, et al. Assessment of the effectiveness of spatiotemporal fusion of multi-source satellite images for cotton yield estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 44-52.

[26] 刘峻明, 周舟, 和晓彤, 等. 频率直方图与植被指数结合的冬小麦遥感产量估测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 145-152. [Liu Junming, Zhou Zhou, He Xiaotong, et al. Estimating winter wheat yield under frequency histogram and vegetation index using remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 145-152.]

[27] Cai X L, Sharma B R. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic River Basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 309-316.

[28] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212-213: 198-212.

[29] Bastiaanssen W G M, Ahmad M D, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 9-1-9-9.

[30] 黄青, 王利民, 滕飞. 利用MODIS-NDVI数据提取新疆棉花播种面积信息及长势监测方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 213-217. [Huang Qing, Wang Limin, Teng Fei. MODIS-NDVI-based monitoring of cotton planting areas and growth condition in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 213-217.]

[31] 马春玥, 买买提·沙吾提, 姚杰, 等. 1950—2015年中国棉花生产时空动态变化[J]. 地理学报, 2020, 75(8): 1699-1710. [Ma Chunyue, Sawut Mamat, Yao Jie, et al. Spatio-temporal changes of cotton production in China from 1950 to 2015[J]. Acta Geographica Sinice, 2020, 75(8): 1699-1710.]

[32] 杨欢, 邓帆, 张佳华, 等. 基于MODIS EVI的江汉平原油菜和冬小麦种植信息提取研究[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 208-215. [Yang Huan, Deng Fan, Zhang Jiahua, et al. A study of information extraction of rape and winter wheat planting in Jianghan Plain based on MODIS EVI[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(3): 208-215.]

[33] Xu C C, Zhang X C, Zhang J X, et al. Estimation of crop water requirement based on planting structure extraction from multi-temporal MODIS EVI[J]. Water Resources Management, 2021, 35: 2231-2247.

[34] 于兵. 作物水分生产率及种植适宜度的遥感评价方法[D]. 北京: 清华大学, 2019. [Yu Bing. Remote sensing based assessment method for crop water productivity and planting suitability[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.]

Remote sensing estimation of cotton water productivity in Ugan-Kuqa River Oasis based on Google Earth Engine

HE Xugang[1,2,3], Mamat SAWUT[1,2,3], SHENG Yanfang[1,2,3], LI Rongpeng[1,2,3]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: An accurate and quantitative evaluation of crop water productivity is the basis for the improvement of crop yield in arid regions and is of great significance to alleviate water shortage and drive sustainable agricultural development. We have considered the Ugan-Kuqa River Oasis on the north bank of the Tarim Basin of China as the subject area, and the watershed SEBAL remote sensing evapotranspiration model and cotton distribution identification model are established employing the Google Earth Engine cloud platform from 2009 to 2020. The production estimation model was used to evaluate the moisture productivity of cotton in the watershed. The following results were observed. (1) The cotton production in the Ugan-Kuqa River Oasis ranges from 1610.10 $kg \cdot hm^{-2}$ in 2009 to 1855.05 $kg \cdot hm^{-2}$ in 2020, with a growth rate of 13.20%. The cotton planting area extends to the edge of oasis year by year, and the center of gravity of cotton production moves 2485 m from west to east. (2) The average evapotranspiration (ET) value during the cotton growth period was 686.80 mm in 2009 and was 738.66 mm in 2020, indicating an overall upward trend, with a growth rate of 7.02%. The maximum value of ET during the cotton growth period was observed during the flowering and boll-opening stages. The higher ET value is mainly distributed in the interior of the oasis and at the edge of the north bank of the Tarim River. (3) The average water productivity in 2009 and 2020 was 0.21 $kg \cdot m^{-3}$ and 0.25 $kg \cdot m^{-3}$, respectively, indicating a growth rate of 16% in 12 years. In terms of space, the gravity center of water productivity in the Ugan-Kuqa River Oasis moved 1832 m from the northeast to the southwest of Hongqi Town, with an average annual moving speed of 152.67 $m \cdot a^{-1}$. The water productivity of oasis cotton showed an expanding trend in the east-west direction compared with that in the north-south direction. The trend of spatial distribution direction had been enhanced, and the spatial pattern tended to be agglomerated. (4) After 12 years, the increased yield rate exceeded the increased evapotranspiration rate, promoting the increase of water productivity. Moreover, water productivity is closely related to the cotton planting area and reasonable water irrigation technology. High water productivity is mainly distributed in Xinken Farm in Xayar County and Sangtamu Farm in Xinhe County, respectively. The large-scale planting and intensive management of farms promoted and improved cotton production, stable distribution, and efficient use of agricultural water resources.

Key words: Google Earth Engine (GEE); evapotranspiration; cotton extraction; cotton yield; water productivity; Ugan-Kuqa River Oasis